

GeoAir: Sistem Pengukuran Kualitas Udara Portabel Berbasis IoT dengan Visualisasi *Real-Time* Menggunakan *Mobile Application*

1st Muhammad Syauqi Habibi

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

syauqihb@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Aloysius Adya Pramudita

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id

3rd Casmika Saputra

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

casmika@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kualitas udara merupakan aspek penting yang perlu dipantau secara akurat dan real-time karena berdampak langsung terhadap kesehatan manusia. Paparan polutan seperti PM2.5, PM10, CO, dan CO₂ dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan, penyakit kronis, hingga kematian dini. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang portabel, memanfaatkan kendaraan sebagai media pengukuran bergerak sehingga cakupan pemantauan menjadi lebih luas dan fleksibel. Sistem dilengkapi sensor SCD30 (CO₂, suhu, kelembapan), MQ-07 (CO), DHT22 (suhu, kelembapan), dan GP2Y1010AUOF (PM2.5, PM10) yang terhubung ke mikrokontroler ESP32 serta GPS pada perangkat Android. Data dikirim secara real-time melalui koneksi Wi-Fi ke Blynk Cloud untuk visualisasi parameter udara dan Firebase Realtime Database untuk penyimpanan data lokasi, lalu ditampilkan pada aplikasi mobile berbasis Android serta LCD 16x2 I2C. Pengujian dilakukan di lingkungan Universitas Telkom pada Juli 2025, meliputi validasi sensor dengan alat referensi, pengujian akurasi setelah kalibrasi regresi linear, serta uji alpha dan beta aplikasi dengan 35 responden. Hasil menunjukkan sistem mampu memberikan informasi kualitas udara secara dinamis, akurat, dan mudah diakses, sehingga layak digunakan sebagai solusi pemantauan udara yang efisien dan berpotensi dikembangkan lebih lanjut.

Kata kunci — Aplikasi Monitoring, GPS, Internet of Things, Kualitas Udara, Sensor Gas

I. PENDAHULUAN

Polusi udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang paling sering terjadi dalam kehidupan sehari-hari dan menjadi isu penting di berbagai negara, termasuk Indonesia. Penyebab utama polusi udara berasal dari aktivitas manusia seperti emisi kendaraan bermotor, kegiatan industri, pembakaran sampah, serta faktor alami seperti kebakaran hutan dan letusan gunung berapi. Kualitas udara yang buruk dapat menimbulkan ancaman serius terhadap kesehatan manusia, lingkungan, dan ekosistem secara keseluruhan. Dampak jangka panjang paparan udara tercemar berpotensi meningkatkan risiko penyakit kronis, seperti asma, bronkitis, hingga kanker paru-paru, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit kronis.

Indonesia sebagai negara berkembang memiliki tingkat penggunaan kendaraan bermotor yang sangat

tinggi. Berdasarkan data Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (GAKINDO), jumlah kendaraan bermotor aktif hingga 9 Februari 2023 mencapai 153.400.392 unit, yang terdiri dari 127.976.339 unit sepeda motor (87%) dan 19.177.264 unit mobil pribadi [1]. Tingginya jumlah kendaraan bermotor tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap pencemaran udara di wilayah perkotaan. Kondisi lalu lintas yang padat, minimnya ruang hijau, serta tata ruang kota yang kurang memadai turut memperburuk kualitas udara [1], [2].

Polusi udara di Indonesia merupakan masalah lingkungan yang mendesak karena berdampak langsung terhadap kesehatan masyarakat, ekosistem, dan pembangunan ekonomi [3]. Upaya peningkatan kualitas udara perlu dilakukan untuk menciptakan lingkungan yang lebih sehat dan aman. Salah satu inovasi yang dapat diterapkan adalah pemantauan polusi udara berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan kendaraan sebagai media pengukuran bergerak. Sistem ini memungkinkan pengukuran kadar polusi secara real-time melalui sensor IoT yang dipasang pada kendaraan. Data yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk menentukan tingkat polusi udara di berbagai lokasi, sekaligus menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah dan masyarakat dalam merumuskan kebijakan serta solusi penanganan [4].

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori yang digunakan dalam pengembangan sistem GEO AIR mencakup konsep *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan lingkungan, penerapan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sebagai acuan kualitas, visualisasi data *real-time* melalui *mobile application*, serta studi penelitian sebelumnya seperti SPKU dan Nafas Indonesia sebagai perbandingan. Berikut merupakan penjelasan dari kajian teori yang digunakan:

A. Internet of Things

Internet of Things adalah konsep teknologi yang memungkinkan perangkat fisik seperti sensor, mikrokontroler, dan aktuator untuk saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet secara otomatis. Dalam konteks pemantauan kualitas udara, IoT memberikan efisiensi tinggi karena mampu melakukan

akuisisi data secara *real-time* dan terdistribusi secara luas. Menurut Susanto et al. (2022), IoT memungkinkan benda-benda di sekitar kita untuk terhubung dengan internet, sehingga aktivitas sehari-hari menjadi lebih mudah dan efisien [5].

B. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Penentuan spesifikasi sensor dan parameter polusi yang diukur dalam sistem ini tidak lepas dari regulasi resmi pemerintah. Tingkat dan paparan polusi udara dapat dipantau melalui pemantauan kualitas udara yang disajikan dalam bentuk Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU). ISPU merupakan angka tanpa satuan yang digunakan untuk menggambarkan kualitas udara ambien di suatu wilayah, berdasarkan dampaknya terhadap kesehatan manusia, keindahan lingkungan, serta makhluk hidup lainnya [6]. Tabel 1 yang berisi kategori ISPU.

TABEL 1
Kategori ISPU

Rentang	Kategori	Keterangan
1–50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan dampak negatif terhadap manusia, tumbuhan dan hewan.
51–100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101–200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan
201–300	Sangat tidak sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan risiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar
>301	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat

Perhitungan ISPU diatas dilakukan berdasarkan nilai ISPU batas atas, ISPU batas bawah, ambien batas atas, ambien batas bawah, dan konsentrasi ambien hasil pengukuran. Persamaan matematika perhitungan ISPU sebagai berikut:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (1)$$

Dimana:

- I = ISPU terhitung
- I_a = ISPU batas atas
- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_b = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_x = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Baku mutu di atas hanya berlaku untuk beberapa parameter saja di antaranya PM2.5, PM10, CO, SO₂, O₃, HC. Dari setiap parameter memiliki ukuran tersendiri untuk nilai ISPU-nya, maka dari itu nilai ISPU untuk satu parameter tidak bisa mewakili parameter ISPU lainnya.

C. Visualisasi Data melalui *Mobile Application*

Visualisasi data pada *mobile application* menjadi

salah satu aspek penting dalam memberikan informasi kualitas udara secara *real-time* dan mudah dipahami oleh pengguna. Standar ISO 9241-110 menetapkan prinsip desain dialog antara sistem dan pengguna agar sesuai dengan kebutuhan, termasuk kemudahan penggunaan, konsistensi elemen visual, serta penyajian umpan balik yang jelas [7]. Dalam pengembangan GEO AIR, aplikasi mobile dirancang responsif dan intuitif, memuat fitur seperti tampilan nilai Air Quality Index (AQI), konsentrasi polutan (PM2.5, PM10, CO, CO₂), peta lokasi pengukuran berbasis GPS, grafik historis, serta notifikasi kondisi udara. Desain antarmuka memastikan pengguna dapat memantau data lingkungan dengan cepat, akurat, dan nyaman di berbagai kondisi penggunaan.

D. Penelitian Terkait

Beberapa sistem pemantauan kualitas udara telah dikembangkan sebelumnya, antara lain:

1. Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) – Sistem resmi yang dikelola Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menggunakan perangkat stasioner untuk mengukur kualitas udara di titik tetap. SPKU memiliki akurasi tinggi dan data dapat diakses publik secara *real-time*, namun jangkauannya terbatas dan bersifat statis.
2. Nafas Indonesia – Platform swasta berbasis IoT yang memanfaatkan jaringan sensor berbiaya rendah untuk memantau kualitas udara secara *real-time* di berbagai kota besar. Nafas Indonesia unggul dari sisi kemudahan akses melalui aplikasi mobile, namun akurasinya masih di bawah standar SPKU dan distribusi sensornya belum merata di seluruh wilayah.

Kedua sistem tersebut menjadi referensi penting dalam pengembangan GEO AIR, yang memadukan mobilitas sistem pemantauan berbasis kendaraan dengan integrasi IoT dan visualisasi data melalui aplikasi *mobile*.

III. METODE

A. Desain Sistem

Untuk mengoptimalkan solusi yang diusulkan, diperlukan perancangan yang terstruktur dan komprehensif, meliputi keseluruhan arsitektur sistem beserta komponen pendukungnya. Rancangan arsitektur dan masing-masing sub-sistem disajikan sebagai acuan dalam implementasi solusi yang direncanakan.

i. Arsitektur Sistem

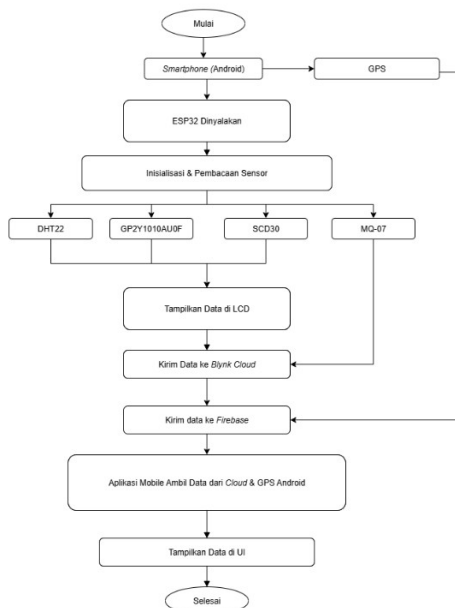


GAMBAR 1
Sistem Arsitektur

Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem yang terdiri dari tiga sub-sistem utama dalam proyek pemantauan kualitas

udara berbasis IoT. Sub-sistem 1 merupakan bagian *hardware* yang terdiri dari berbagai sensor seperti sensor suhu, kelembapan, karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂), serta mikrokontroler ESP32 yang berfungsi untuk membaca data dari sensor. Serta data GPS dari *handphone* admin, data yang diperoleh kemudian dikirimkan ke Sub-sistem 2, yaitu layanan *cloud* menggunakan platform Blynk, serta data GPS dikirim ke layanan *cloud* firebase. Di *cloud*, data disimpan dan dapat diakses secara *real-time*. Selanjutnya, data yang telah tersimpan ini ditampilkan kepada pengguna melalui Sub-sistem 3, yaitu aplikasi *mobile*. Aplikasi ini memungkinkan pengguna memantau kondisi udara secara langsung melalui tampilan antarmuka yang sederhana dan informatif di *smartphone*. Integrasi dari ketiga sub-sistem ini memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dan memberikan informasi yang akurat dan terkini mengenai kualitas udara di lingkungan sekitar.

ii. Flowchart

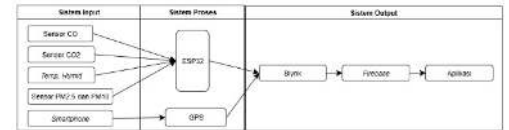


GAMBAR 2

Flowchart Alur Kerja Sistem

Gambar 2 di atas menggambarkan alur kerja sistem deteksi kualitas udara menggunakan berbagai jenis sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Semua data dari sensor kemudian dikirim dan diproses oleh mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler ini mengatur pengumpulan dan pengiriman data ke aplikasi Blynk sebagai media pencatatan dan tampilan data secara *real-time*. Dengan pendekatan ini, sistem dapat memantau berbagai parameter kualitas udara secara komprehensif dan menyajikannya dalam bentuk yang mudah

diakses melalui perangkat *mobile*.



GAMBAR 3

Diagram Blok Sistem Pemantauan Kualitas Udara

Diagram Blok pada Gambar 3 menunjukkan bagaimana sistem pemantauan kualitas udara bekerja dari awal hingga akhir. Pertama, sistem ini memulai dengan mengumpulkan data kualitas udara dari sensor-sensor, misalnya sensor partikel debu dan gas, serta GPS untuk mengetahui koordinat lokasi. Setelah itu, data yang dihasilkan dari sensor dikumpulkan dan diproses di dalam mikrokontroler agar lebih mudah dibaca dan dikirim ke server. Setelah data sudah siap, informasi data akan dikirim ke server lewat teknologi komunikasi seperti WiFi. Di server, data akan diolah dan dianalisis. Di server, data akan diolah dan dianalisis untuk ditampilkan dalam format yang mudah dipahami. Kemudian data akan disimpan di *database cloud* agar dapat diakses kapan saja atau melihat *history* pemantauan kualitas udara. Data akan dikirimkan secara *real-time* ke aplikasi *mobile*. Dengan begitu, pengguna dapat melihat informasi kualitas udara pada saat itu juga lengkap dengan lokasi dan parameter penting lainnya. Proses ini berlangsung secara terus menerus untuk memastikan pemantauan kualitas udara dapat dilakukan dengan efisien dan *up-to-date*.

B. Implementasi

Bagian ini menjelaskan proses implementasi sistem GEO AIR yang meliputi perakitan perangkat keras, integrasi sensor, pemrograman mikrokontroler, dan pengembangan aplikasi mobile untuk visualisasi data. Implementasi dilakukan berdasarkan desain sistem yang telah dirancang sebelumnya untuk memastikan seluruh komponen berfungsi sesuai perannya dalam pemantauan kualitas udara secara *real-time*.

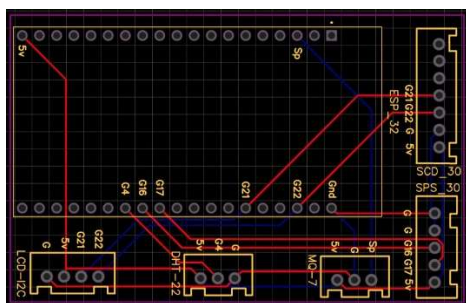
i. Implementasi Hardware

Pada tahap ini, dilakukan perancangan dan perakitan perangkat keras sebagai fondasi utama sistem GEO AIR. Pemilihan komponen dilakukan secara cermat untuk memastikan sistem mampu melakukan pengukuran kualitas udara secara akurat, *real-time*, dan portabel. Setiap perangkat keras memiliki peran spesifik yang saling mendukung, mulai dari pengambilan data, pemrosesan, hingga penyajian informasi kepada pengguna. Komponen perangkat

keras yang digunakan pada sistem GEO AIR meliputi:

- Mikrokontroler ESP32: Pusat pemrosesan dan pengendalian sistem, menghubungkan sensor serta mengirim data ke server melalui Wi-Fi.
- Sensor SCD30: Mengukur konsentrasi CO₂, suhu, dan kelembapan.
- Sensor MQ-07: Mendeteksi karbon monoksida (CO) di udara.
- Sensor DHT22: Mengukur suhu dan kelembapan tambahan.
- Sensor GP2Y1010AUOF: Mendeteksi partikel debu PM2.5 dan PM10.
- PCB: Sebagai papan sirkuit yang menghubungkan dan menopang komponen elektronik secara terorganisir dan permanen.
- LCD 16x2 I2C: Menampilkan data pengukuran secara lokal.

Sistem monitoring kualitas udara GEO AIR dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang mengendalikan akuisisi dan pengolahan data dari berbagai sensor. Sensor SCD30 digunakan untuk mengukur konsentrasi karbon dioksida (CO₂) serta suhu dan kelembapan melalui komunikasi I2C. Sensor GP2Y1010AUOF berfungsi mendeteksi partikel debu (PM1.0, PM2.5, dan PM10) yang juga terhubung melalui jalur I2C atau UART tergantung konfigurasi perangkat lunaknya, sedangkan sensor MQ-07 mendeteksi gas karbon monoksida (CO) menggunakan pin analog ESP32. Untuk pengukuran tambahan suhu dan kelembapan digital, digunakan sensor DHT22. Seluruh data diolah oleh ESP32 dan ditampilkan secara *real-time* pada LCD 16x2 I2C. Seluruh rangkaian disusun pada papan *Printed Circuit Board* (PCB) seperti pada Gambar 3, dengan mempertimbangkan tata letak komponen, efisiensi jalur koneksi, serta kestabilan daya untuk memastikan sistem berjalan dengan baik dan akurat.

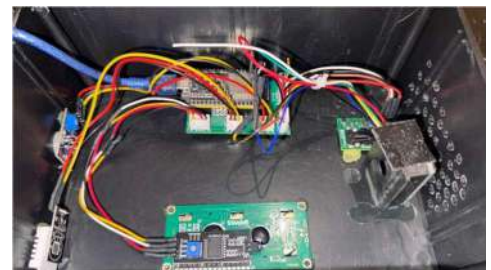


GAMBAR 3
Desain PCB

Gambar 4 menunjukkan perangkat

keras sistem monitoring kualitas udara yang telah dirakit dalam sebuah *casing*. Sensor MQ-7 dan GP2Y1010AUOF diletakkan dekat lubang ventilasi untuk mendeteksi kualitas udara secara optimal. Seluruh komponen dihubungkan dengan kabel jumper dalam *casing* yang berfungsi sebagai pelindung serta untuk menjaga kerapian dan keamanan perangkat. Kabel USB digunakan sebagai sumber daya sekaligus media komunikasi dengan komputer.

Sedangkan Gambar 5 menampilkan hasil perakitan perangkat keras di dalam *casing* pelindung. Terdapat kabel USB yang terhubung ke sisi perangkat, yang berfungsi sebagai media suplai daya sekaligus komunikasi data dengan komputer. Desain *casing* memperhatikan portabilitas, perlindungan komponen, dan kemudahan integrasi dengan sistem lain melalui koneksi USB.



GAMBAR 4
Tampilan Bagian Dalam Rangkaian



GAMBAR 5
Tampilan Hardware

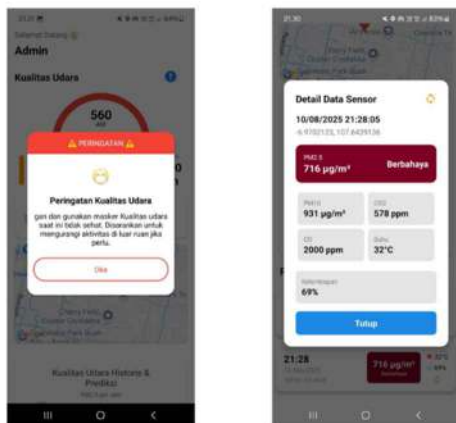
ii. Implementasi Mobile Application



GAMBAR 6
Mobile Application 1

Gambar 6 merupakan tampilan UI dari aplikasi mobile bernama GeoAir, yang dirancang untuk memantau kualitas udara secara *real-time* menggunakan data dari sensor IoT. Pada tampilan awal, aplikasi menampilkan logo Geo Air sebagai halaman pembuka sebelum masuk ke menu utama. Setelah itu, pengguna diarahkan ke halaman utama yang pada bagian atasnya terdapat indikator Air Quality Indeks (AQI) berbentuk setengah lingkaran. Indikator ini dilengkapi dengan nilai AQI, kategori kualitas udara, serta warna yang berubah sesuai tingkat bahaya.

Di bawah indikator AQI terdapat informasi kadar gas dan parameter lingkungan seperti CO₂, PM10, CO, kelembapan udara, dan suhu. Selanjutnya, aplikasi menampilkan peta interaktif berbasis Google Maps yang menunjukkan lokasi pengambilan data. Tepat di bawah peta, tersedia grafik histori dan prediksi PM2.5 per jam dalam bentuk diagram batang. Nilai PM2.5 ditampilkan jelas di atas setiap batang, sehingga memudahkan pengguna melihat tren perubahan kadar PM2.5 dalam periode waktu tertentu. Visualisasi ini membantu pengguna menganalisis fluktuasi polusi udara dengan lebih mudah.



GAMBAR 7
Mobile Application 2

Berdasarkan Gambar 7, pada bagian kanan atas halaman utama terdapat ikon berwarna biru yang berfungsi menampilkan peringatan otomatis. Ketika ikon ini ditekan, akan muncul pop up berwarna merah dengan ikon peringatan dan emotikon masker. Pesan peringatan memberikan informasi bahwa kualitas berada pada kategori tidak sehat atau berbahaya, serta menyarankan penggunaan masker dan pembatasan aktivitas luar ruangan. Halaman utama dapat digulir ke bawah untuk menuju bagian histori data. Bagian ini memuat catatan hasil pengukuran

sebelumnya per 5 menit dalam kurun waktu 7 hari. Bagian ini memuat catatan hasil pengukuran sebelumnya, mulai dari nilai AQI beserta kategorinya, kadar gas terdeteksi, hingga titik koordinat lokasi dalam bentuk longitude dan latitude. Secara keseluruhann, keseluruhan tampilan memudahkan pengguna dalam indormasi kualitas udara mulai dari indikator uta,a, detail parameter, tren polusi, hingga riwayat data, dengan dukungan fitur peringatan yang responsif untuk kondisi untuk kondisi udara yang berisiko.

iii. Implementasi Cloud

Sistem GEO AIR memanfaatkan dua layanan *cloud* utama untuk mendukung pengolahan, penyimpanan, dan visualisasi data, yaitu Blynk Cloud dan Firebase Realtime Database.

Blynk Cloud berfungsi sebagai penghubung antara perangkat keras sensor dan aplikasi *mobile* pada sistem IoT. Mikrokontroler ESP32 yang terpasang pada transportasi umum terhubung dengan sensor SCD30 (CO₂), MQ-7 (CO), DHT22 (suhu dan kelembapan), serta GP2Y1010AUOF (partikel debu). Seluruh data dari sensor dikirim secara *real-time* ke Blynk melalui koneksi internet. Blynk menyediakan *dashboard* visualisasi dan API yang memudahkan integrasi perangkat keras dengan aplikasi, sehingga data sensor dapat dikirim, disimpan, dan dimonitor melalui widget aplikasi Blynk atau integrasi *custom API* pada aplikasi Android.

Firebase Realtime Database digunakan untuk menyimpan dan memantau data lokasi GPS secara dinamis. Layanan ini menerima koordinat GPS yang dikirimkan oleh aplikasi *mobile* di transportasi umum, kemudian melakukan sinkronisasi data lintas perangkat. Firebase juga menyediakan API yang memungkinkan data lokasi digabungkan dengan data sensor dari Blynk, sehingga dapat divisualisasikan dalam bentuk peta menggunakan *Google Maps API*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem monitoring kualitas udara dilakukan di lingkungan terbuka dengan kondisi dinamis seperti pinggir jalan raya, kawasan pemukiman padat, dan taman kota. Selama pengujian, sensor-sensor seperti SCD30 untuk CO₂, MQ-7 untuk karbon monoksida, DHT22 untuk suhu dan kelembapan, serta sensor debu GP2Y1010AUOF, dioperasikan secara *real-time* dan terhubung ke platform Blynk untuk pemantauan data secara daring [8]. Data yang diperoleh dibandingkan dengan alat referensi untuk mengukur tingkat akurasi dari

masing-masing sensor.

A. Pengujian Suhu

TABEL 2
Pengujian Suhu

DATA SUHU							
NO	Waktu		Suhu	Suhu	Data Koreksi	Akurasi	Error
	Tanggal	Jam	DHT22	Referensi			
1	17/07/2025	20:16	29,30 °C	27,76 °C	28,57	97%	3%
2	17/07/2025	20:17	28,50 °C	27,39 °C	27,85	98%	2%
3	17/07/2025	20:18	28,20 °C	27,39 °C	27,57	99%	1%
4	17/07/2025	20:19	27,90 °C	27,25 °C	27,30	100%	0%
5	17/07/2025	20:20	27,70 °C	27,24 °C	27,12	100%	0%
6	22/07/2025	16:38	27,60 °C	27,50 °C	27,03	98%	2%
7	22/07/2025	16:40	27,70 °C	27,70 °C	27,12	98%	2%
8	22/07/2025	16:41	27,70 °C	27,90 °C	27,12	97%	3%
9	22/07/2025	16:43	27,70 °C	27,10 °C	27,12	97%	3%
10	22/07/2025	16:44	27,70 °C	27,30 °C	27,12	96%	4%
Rata-rata							2%

Berdasarkan Tabel 2 pengujian suhu dilakukan untuk membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 dengan alat referensi HT9600 yang digunakan sebagai standar acuan. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dalam dua sesi, yaitu pada malam hari tanggal 17 Juli 2025 (pengujian 1–5) dan siang hari tanggal 22 Juli 2025 (pengujian 6–10). Data yang diperoleh meliputi pembacaan suhu sensor, suhu referensi, dan hasil koreksi menggunakan regresi linear.

Persamaan (2) merupakan regresi linear yang diperoleh untuk memperbaiki hasil pembacaan sensor agar lebih mendekati nilai acuan, yaitu:

$$y = -0,0908x + 30,195 \quad (2)$$

dengan x adalah nilai suhu dari sensor DHT22 dan y adalah suhu hasil koreksi. Nilai hasil koreksi ini digunakan untuk menghitung *error* dan akurasi menggunakan persamaan (3) dan (4) berikut:

$$Error = \left(\frac{|Data Koreksi - Referensi|}{Referensi} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$Akurasi = \left(1 - \frac{|Data Koreksi - Referensi|}{Referensi} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Berdasarkan hasil pengujian, rata-rata akurasi sensor setelah koreksi mencapai 98% dengan *error* rata-rata sebesar 2%. Pada sesi malam hari, akurasi berkisar antara 97%–99% dengan *error* 1%–3%, sedangkan pada sesi siang hari akurasi berkisar antara 98%–100% dengan *error* 0%–2%. Nilai akurasi yang tinggi ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki kinerja yang baik dalam pengukuran suhu, terutama setelah proses kalibrasi menggunakan metode regresi linear. Dengan performa ini, sensor DHT22 dapat diandalkan sebagai bagian dari sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT.

B. Pengujian Kelembapan

TABEL 3
Pengujian Kelembapan

DATA KELEMBAPAN							
NO	Waktu		Suhu	Suhu	Data Koreksi	Akurasi	Error
	Tanggal	Jam	DHT22	Referensi			
1	17/07/2025	20:16	67,80 %	66,00 %	65,02	98%	2%
2	17/07/2025	20:17	69,80 %	68,30 %	64,48	97%	3%
3	17/07/2025	20:18	70,10 %	69,00 %	65,02	95%	5%
4	17/07/2025	20:19	71,30 %	70,20 %	67,57	89%	11%
5	17/07/2025	20:20	71,90 %	71,10 %	64,48	95%	5%
6	22/07/2025	16:38	69,4 %	63,8 %	63,57	97%	3%
7	22/07/2025	16:40	68,8 %	62,7 %	65,38	98%	2%
8	22/07/2025	16:41	69,4 %	61,9 %	65,66	98%	2%
9	22/07/2025	16:43	72,2 %	60,9 %	66,75	98%	2%
10	22/07/2025	16:44	68,8 %	61,3 %	67,29	99%	1%
Rata-rata							4%

Data yang diperoleh pada Tabel 3 meliputi waktu pengukuran, hasil kelembapan dari sensor DHT22, hasil dari alat referensi HT9600, data koreksi hasil perhitungan regresi linear, nilai akurasi, dan *error*. Koreksi data dilakukan menggunakan metode regresi linear untuk mengurangi deviasi pembacaan sensor terhadap nilai acuan. Persamaan regresi (5) yang diperoleh dari analisis hubungan kelembapan sensor DHT22 (variabel x) dan alat referensi HT9600 (variabel y) adalah sebagai berikut:

$$y = -0,0908x + 1,9428 \quad (5)$$

Nilai koreksi kemudian digunakan untuk menghitung *error* menggunakan persamaan (3) dan akurasi menggunakan persamaan (4). Pada sesi pertama, akurasi berkisar 95%–98% dengan *error* 2%–5%. Pada sesi kedua, sebagian besar hasil tetap menunjukkan akurasi tinggi, meskipun terdapat peningkatan *error* hingga 11% pada beberapa data, yang kemungkinan disebabkan oleh kondisi lingkungan yang lebih lembap dan fluktuatif pada sore hari.

Rata-rata *error* seluruh pengujian adalah 4%, yang menunjukkan deviasi relatif kecil terhadap nilai acuan, terutama setelah dilakukan kalibrasi. Dengan akurasi yang konsisten di atas 95%, sensor DHT22 dapat diandalkan untuk pemantauan kelembapan udara berbasis IoT di lingkungan terbuka.

C. Pengujian CO₂

TABEL 4
Pengujian CO₂

DATA CO ₂							
NO	Waktu		Karbon Dioksida CO ₂	Karbon Dioksida CO ₂ Alat Referensi	Data Koreksi	Akurasi	Error
	Tanggal	Jam					
1	17/07/2025	20:16	552 ppm	404 ppm	410	98,60%	1,40%
2	17/07/2025	20:17	528 ppm	396 ppm	405	97,67%	2,33%
3	17/07/2025	20:18	521 ppm	391 ppm	404	96,70%	3,30%
4	17/07/2025	20:19	521 ppm	392 ppm	404	96,96%	3,04%
5	17/07/2025	20:20	523 ppm	396 ppm	404	97,91%	2,09%
6	22/07/2025	16:38	489 ppm	414 ppm	398	96,11%	3,89%
7	22/07/2025	16:40	503 ppm	430 ppm	400	93,13%	6,87%
8	22/07/2025	16:41	874 ppm	435 ppm	470	92,05%	7,95%
9	22/07/2025	16:43	1423 ppm	587 ppm	572	97,36%	2,64%
10	22/07/2025	16:44	503 ppm	422 ppm	400	94,90%	5,10%
							3,86%

Berdasarkan Tabel 4 pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor SCD30 terhadap alat referensi AR8200. Data yang diperoleh mencakup waktu pengukuran, hasil sensor, hasil referensi, nilai koreksi dari perhitungan regresi linear, akurasi, dan *error*. Koreksi dilakukan untuk mengurangi deviasi pembacaan sensor terhadap nilai acuan, dengan persamaan (6) yaitu regresi sebagai berikut:

$$y = -0,0908x + 307,11 \quad (6)$$

Nilai koreksi ini selanjutnya digunakan untuk menghitung *error* dan akurasi menggunakan persamaan (3) dan (4). Sebagai contoh, pada pengukuran tanggal 17 Juli 2025 pukul 20:16, sensor mencatat 552 ppm sementara alat referensi menunjukkan 404 ppm. Setelah koreksi, diperoleh nilai 404,94 ppm dengan *error* 1,40% dan akurasi 98,60%, menunjukkan efektivitas model regresi linear dalam memperbaiki pembacaan.

Secara keseluruhan, akurasi sensor berada pada kisaran 93,13%–98,60% dengan rata-rata *error* 3,86% dari sepuluh pengukuran. Deviasi cenderung meningkat pada konsentrasi CO₂ yang tinggi, namun hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor SCD30 tetap memberikan performa yang konsisten dan dapat diandalkan untuk estimasi konsentrasi CO₂. Dengan penerapan kalibrasi regresi linear, sensor ini layak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT), terutama jika dilengkapi pengolahan data tambahan untuk meningkatkan keakuratan dalam berbagai kondisi lingkungan.

D. Pengujian PM 2.5

TABEL 5
Pengujian PM 2.5

DATA PM2.5								
NO	Waktu		GP2Y1010 AUOF PM2.5	PM2.5 HT9600	Data Koreksi	Akurasi	ISPU	Error
	Tanggal	Jam						
1	17/07/2025	20:16	500 µg/m ³	79 µg/m ³	97	77%	Tidak Sehat	22,87%
2	17/07/2025	20:17	564 µg/m ³	254 µg/m ³	136	54%	Tidak Sehat	46,35%
3	17/07/2025	20:18	618 µg/m ³	107 µg/m ³	169	42%	Sangat Tidak Sehat	58,26%
4	17/07/2025	20:19	475 µg/m ³	87 µg/m ³	82	94%	Tidak Sehat	6,02%
5	17/07/2025	20:20	511 µg/m ³	99 µg/m ³	104	95%	Tidak Sehat	4,85%
6	22/07/2025	16:38	448,46 µg/m ³	42 µg/m ³	66	44%	Tidak Sehat	55,97%
7	22/07/2025	16:40	479,88 µg/m ³	52 µg/m ³	85	37%	Tidak Sehat	62,98%
8	22/07/2025	16:41	423,08 µg/m ³	879 µg/m ³	-	-	-	-
9	22/07/2025	16:43	440,81 µg/m ³	860 µg/m ³	-	-	-	-
10	22/07/2025	16:44	398,11 µg/m ³	53 µg/m ³	35	65%	Sedang	34,58%
Rata-rata								36%

Tabel 5 menampilkan hasil pengujian PM2.5 untuk mengevaluasi kinerja sensor GP2Y1010 dibandingkan alat referensi HT9600. Pengujian dilakukan di dua lokasi terbuka dengan kondisi lingkungan berbeda: malam hari (17 Juli 2025) di gapura Telkom University dan sore hari (22 Juli 2025) di Cigaitri Indah. Data dari sensor dikoreksi menggunakan persamaan regresi linear hasil kalibrasi:

$$y = -0,0908x + 209,13 \quad (7)$$

dengan x adalah pembacaan GP2Y1010 dan y adalah nilai referensi HT9600. Setelah koreksi, dihitung *error* sesuai dengan persamaan (3), akurasi sesuai persamaan (4), dan kategori ISPU sesuai persamaan (1).

Hasilnya menunjukkan rata-rata *error* 36% dengan akurasi 37–95%, mayoritas berada pada kategori “Tidak Sehat”, dan satu data mencapai “Sangat Tidak Sehat” (107 µg/m³; *error* 58,26%). Dua data (baris ke-8 dan ke-9) dikecualikan karena nilai referensi ekstrem (879 µg/m³ dan 860 µg/m³) yang diduga anomali akibat faktor lingkungan seperti asap atau debu intens, sehingga tidak relevan untuk dikoreksi. Perbedaan waktu dan lokasi berpengaruh pada stabilitas data: malam hari di gapura Telkom University menghasilkan pembacaan lebih konsisten, sedangkan sore hari di Cigaitri Indah menunjukkan fluktuasi tinggi akibat panas, aktivitas lingkungan, dan potensi outlier. Secara keseluruhan,

GP2Y1010 layak digunakan pada sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT skala menengah, namun untuk kebutuhan presisi tinggi diperlukan kalibrasi lanjutan.

E. Pengujian PM 10

TABEL 6
Pengujian PM 10

DATA PM10								
NO	Waktu		GP2Y1010	PM10	Data Koreksi	Akurasi	ISPU	Error
	Tanggal	Jam	AUOF PM2.5	Alat Referensi				
1	17/07/2025	20:16	650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	182,89	67%	Tidak Sehat	33%
2	17/07/2025	20:17	756 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	541 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	295,23	55%	Tidak Sehat	45%
3	17/07/2025	20:18	803 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	201 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	345,04	28%	Tidak Sehat	72%
4	17/07/2025	20:19	618 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	148,98	93%	Sedang	7%
5	17/07/2025	20:20	665 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	169 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	198,79	82%	Tidak Sehat	18%
6	22/07/2025	16:38	583 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	111,88	60%	Sedang	40%
7	22/07/2025	16:40	623 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	154,28	39%	Tidak Sehat	61%
8	22/07/2025	16:41	550 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2031 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	-
9	22/07/2025	16:43	573 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2602 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	-
10	22/07/2025	16:44	517 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	41,94	45%	Baik	55%
Rata-rata								41%

Berdasarkan Tabel 6, pembacaan konsentrasi PM10 dari sensor GP2Y1010 menunjukkan deviasi dibandingkan alat referensi HT9600. Koreksi dilakukan menggunakan model regresi linear:

$$y = -0,0908x + 505,98 \quad (8)$$

dengan x sebagai nilai pembacaan sensor dan y sebagai nilai referensi. Hasil koreksi digunakan untuk menghitung *error* sesuai persamaan (3) dan akurasi sesuai persamaan (4), serta menentukan kategori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) PM10 sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup sesuai persamaan (1).

Mayoritas data menunjukkan kategori “Tidak Sehat” akibat tingginya konsentrasi PM10, meskipun terdapat beberapa hasil “Sedang” dan “Baik”, seperti pengukuran 22 Juli 2025 pukul 16:44 (referensi 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, koreksi 41,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Rata-rata *error* mencapai 41%, mengindikasikan deviasi signifikan meskipun telah dilakukan koreksi. Kasus *error* tertinggi terdapat pada data ke-3 (72% *error*; akurasi 28%), menandakan keterbatasan sensor dalam mengukur konsentrasi tinggi secara akurat. Data ke-8 dan ke-9 dihapus dari analisis karena nilai referensi ekstrem (2031 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 2602 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) berada di luar jangkauan linear model, sehingga hasil koreksi berpotensi tidak valid. Secara keseluruhan, GP2Y1010 berpotensi digunakan untuk pemantauan PM10 berbasis IoT, namun diperlukan kalibrasi tambahan dan validasi khusus untuk konsentrasi tinggi agar hasil lebih andal.

F. Pengujian CO

TABEL 7
Pengujian CO

DATA CO				
NO	Waktu		MQ7 CO(ppm)	ISPU
	Tanggal	Jam		
1	17/07/2025	20:16	1940 ppm	Berbahaya
2	17/07/2025	20:17	2194 ppm	Berbahaya
3	17/07/2025	20:18	2271 ppm	Berbahaya
4	17/07/2025	20:19	1927 ppm	Berbahaya
5	17/07/2025	20:20	2017 ppm	Berbahaya
6	17/07/2025	20:21	1853 ppm	Berbahaya
7	17/07/2025	20:22	1886 ppm	Berbahaya
8	17/07/2025	20:23	1927 ppm	Berbahaya
9	17/07/2025	20:24	2182 ppm	Berbahaya
10	17/07/2025	20:25	2147 ppm	Berbahaya

Berdasarkan data pada Tabel 7, sensor MQ7 mendeteksi konsentrasi CO antara 1853–2271 ppm, dengan nilai tertinggi 2271 ppm pada pukul 20:18 WIB dan terendah 1853 ppm pada pukul 20:21 WIB. Variasi ini menunjukkan kemampuan sensor merespons perubahan kadar CO secara *real-time*. Untuk menilai dampaknya terhadap kesehatan, nilai konsentrasi diubah menjadi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) menggunakan persamaan (1). Berdasarkan Peraturan Menteri LHK Nomor 14 Tahun 2020 [6], seluruh hasil pengukuran yang berada jauh di atas 15,5 ppm masuk kategori “Berbahaya”. Hal ini menandakan kualitas udara di lokasi pengujian sangat buruk untuk parameter CO, dengan potensi risiko serius terhadap kesehatan. Meskipun belum divalidasi dengan alat referensi resmi, sensor MQ7 terbukti efektif sebagai alat deteksi awal keberadaan CO di udara.

G. Pengujian Alpha

TABEL 8
Pengujian Alpha

NO	Pengujian	Prosedur Pengujian	Parameter Keberhasilan	Hasil	Keterangan
1.	Membuka Aplikasi	Mengklik Aplikasi GEOAIR.	Aplikasi Terbuka	Muncul <i>Splashscreen</i> logo	Ya
2	Membuka Halaman <i>Homepage</i> Utama	Menunggu sekitar 2 Detik	Halaman <i>Home</i>	Muncul Halaman Utama	Ya
3	Melihat <i>Monitoring Sensor</i>	Melihat apakah <i>value</i> sensor yang sesuai dengan ada pada alat	Tampilan nilai sensor akurat	Data Sensor Sesuai	Ya
4	Melihat titik Koordinat GPS	Membandingkan apakah titik lokasi GPS pada aplikasi sudah sesuai dengan aslinya	Tampilan peta pada halaman utama	Sesuai pada Titik Koordinat	Ya
5	Melihat indikasi peringatan ketika AQI Indeks Sedang atau Berbahaya	Melihat apakah AQI indeks dalam kondisi sedang atau buruk maka peringatan akan muncul	Tampilan indeks AQI pada halaman utama	Muncul Pada Halaman Utama Berupa <i>Icon</i> Peringatan	Ya

Pengujian alpha merujuk pada tahap awal pengujian perangkat lunak setelah proses pengembangan selesai, tetapi sebelum perangkat lunak tersebut dirilis. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mendeteksi apakah data bisa di ambil dari *cloud* serta memastikan bahwa semua komponen pada aplikasi berfungsi dengan baik. Dalam pengujian ini, penulis menguji fungsionalitas setiap fitur dan memantau perubahan nilai sensor yang terjadi secara berkala sesuai dengan pengaturan yang telah ditentukan. Hasil dari pengujian ini didapatkan hasil pada Tabel 8.

H. Pengujian Beta

TABEL 9
Pengujian Beta

NO	Pernyataan	SS (Sangat Setuju)	S (Setuju)	N (Netral)	TS (Tidak Setuju)	STS (Sangat Tidak Setuju)
1	Tampilan aplikasi ini terlihat menarik secara visual.	16	13	5	1	0
2	Warna, ikon, dan grafik pada aplikasi mudah dikenali dan dipahami.	18	14	3	0	0
3	Informasi seperti CO ₂ , CO, PM10, suhu, dan kelembapan ditampilkan dengan jelas.	22	11	4	0	0
4	Tata letak elemen pada aplikasi tersusun secara rapi dan tidak membingungkan.	16	15	4	0	0
5	Saya dapat memahami cara kerja aplikasi tanpa perlu membaca panduan.	16	14	4	1	0
6	Saya tidak mengalami kesulitan dalam mengakses fitur-fitur di aplikasi.	15	15	5	0	0
7	Navigasi antar halaman dan menu di aplikasi terasa mudah dan intuitif.	15	17	3	0	0
8	Aplikasi ini memberikan respon yang cepat saat digunakan.	16	14	4	1	0
9	Saya merasa puas menggunakan aplikasi ini untuk memantau kualitas udara.	19	13	3	0	0
10	Saya merasa fitur yang tersedia dalam aplikasi cukup lengkap untuk kebutuhan saya.	17	15	3	0	0
11	Saya bersedia menggunakan aplikasi ini secara rutin di kemudian hari.	16	15	4	0	0

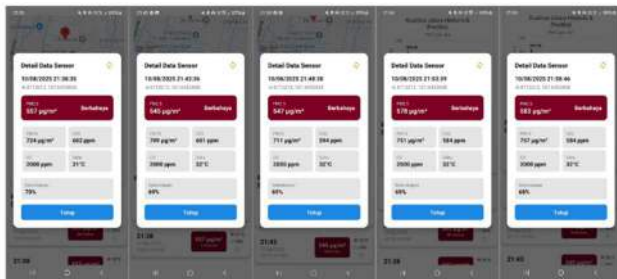
Pengujian beta dilakukan sebagai tahap kedua setelah perangkat lunak lulus uji alpha, dengan tujuan mengevaluasi penerimaan aplikasi pemantauan kualitas udara dari aspek visual, kemudahan penggunaan, dan fungsionalitas. Uji ini melibatkan 35 responden yang mengakses aplikasi secara langsung, kemudian memberikan penilaian terhadap sebelas pernyataan menggunakan skala Likert lima poin.

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 9, mayoritas responden memberikan penilaian positif pada semua aspek. Sebanyak 30 responden menyatakan setuju atau sangat setuju bahwa tampilan aplikasi menarik secara visual, sementara 32 responden menilai warna, ikon, dan

grafik mudah dikenali. Informasi yang ditampilkan, meliputi data CO₂, CO, PM10, suhu, dan kelembapan, dinilai jelas oleh 33 responden. Selain itu, 31 responden setuju bahwa tata letak elemen dalam aplikasi rapi dan tidak membingungkan.

Dari sisi *usability*, sebanyak 30 responden menyatakan aplikasi mudah dipahami tanpa memerlukan panduan, dan navigasi antarmuka dinilai intuitif. Performa aplikasi juga diapresiasi, dengan sebagian besar responden menganggapnya responsif dan memberikan umpan balik cepat, meskipun terdapat satu responden yang merasa kurang puas. Secara keseluruhan, 32 responden puas dengan kelengkapan fitur, dan 31 responden bersedia menggunakan aplikasi secara berkala. Hasil pengujian beta ini menunjukkan bahwa aplikasi telah memenuhi kebutuhan dan harapan pengguna, sehingga layak digunakan secara lebih luas sebagai alat pemantauan kualitas udara.

I. Pengujian Aplikasi



GAMBAR 8
Data Histori Aplikasi

Hasil pengujian pada Gambar 8 menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan data pembacaan sensor secara real-time dan terintegrasi dengan baik dari perangkat keras, mencakup PM2.5, PM10, CO₂, CO, suhu, dan kelembapan beserta keterangan tingkat kualitas udara. Contohnya, nilai PM2.5 pada kisaran 545–583 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dikategorikan “Berbahaya” sesuai standar indeks kualitas udara. Perubahan parameter seperti suhu, kelembapan, dan koordinat lokasi terdeteksi sesuai data yang dikirimkan, membuktikan keberhasilan integrasi perangkat keras dan aplikasi dalam akuisisi, pengiriman, dan visualisasi data secara tepat waktu dan informatif.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem pengukuran polusi udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dipasang pada kendaraan bermotor berhasil mendeteksi dan mengukur parameter kualitas udara, meliputi CO₂, CO, suhu, kelembapan, PM2.5, dan PM10 secara real-time menggunakan Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem pengukuran polusi udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dipasang pada kendaraan bermotor berhasil mendeteksi dan mengukur parameter kualitas udara seperti CO₂, CO, suhu, kelembapan, PM2.5, dan PM10 secara real-time menggunakan sensor SCD30, MQ-07, DHT22, dan GP2Y1010AUOF yang

terhubung ke mikrokontroler ESP32. Data pengukuran berhasil dikirim ke cloud server (Blynk dan Firebase) melalui koneksi Wi-Fi dan ditampilkan secara real-time pada aplikasi mobile Android dan LCD lokal, dengan cakupan pemantauan yang lebih luas berkat sifat sistem yang mobile. Hasil pengujian menunjukkan integrasi perangkat keras dan lunak berjalan stabil, meskipun beberapa sensor seperti MQ-07 dan GP2Y1010AUOF menunjukkan deviasi besar terhadap alat referensi sehingga memerlukan kalibrasi lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi. Sementara itu, uji alpha aplikasi dengan 35 responden menunjukkan penerimaan positif, dengan penilaian tinggi pada kemudahan penggunaan, tampilan, kejelasan informasi, dan kelengkapan fitur, termasuk integrasi Google Maps untuk pemantauan lokasi. Dengan demikian, sistem ini dinilai layak digunakan sebagai solusi awal pemantauan kualitas udara secara efisien, fleksibel, dan murah, sekaligus memiliki potensi untuk pengembangan lebih lanjut demi peningkatan akurasi data di masa mendatang.

REFERENSI

- [1] GAIKINDO, “Jumlah Kendaraan di Indonesia 147 Juta Unit, 60 Persen di Pulau Jawa,” <https://www.gaikindo.or.id/jumlah-kendaraan-di-indonesia-147-juta-unit-60-persen-di-pulau-jawa/>.
- [2] D. S. Al Fathin, “Sistem Pemantauan Polusi Udara Berbasis Internet of Things dengan Algoritma Long Short-Term Memory,” <https://repository.upi.edu/123251/>.
- [3] E. R. N. Wulandari, N. Rosyida, B. Sutawijaya, H. M. Abdullah, and S. R. Asriningtias, “PERANCANGAN SENSOR GAS BERBASIS IoT UNTUK PEMANTAUAN KUALITAS UDARA,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3S1, Oct. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3s1.4977.
- [4] T. V. Damayanti and R. E. Handriyono, “Monitoring Kualitas Udara Ambien Melalui Stasiun Pemantau Kualitas Udara Wonorejo, Kebonsari Dan Tandes Kota Surabaya,” *Environmental Engineering Journal ITATS*, vol. 2, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2022, doi: 10.31284/j.envitats.2022.v2i1.2897.
- [5] F. Susanto, N. Komang Prasiani, and P. Darmawan, “IMPLEMENTASI INTERNET OF THINGS DALAM KEHIDUPAN SEHARI-HARI,” Online, 2022. [Online]. Available: <https://jurnal.std-bali.ac.id/index.php/imagine>
- [6] MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA, “Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara,” <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia>.
- [7] E. Heinold, P. H. Rosen, and S. Wischniewski, “Usability questionnaire for robotic systems based

- on the ISO 9241-110,” *IEEE Robot Autom Lett*, 2025, doi: 10.1109/LRA.2025.3526557.
- [8] A. Amir and M. Ilham, “Sistem Monitoring Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) pada Wilayah Kota berbasis Internet of Things,” vol. 7, no. 2.